

論文96-33B-7-1

# 하이브리드 구조를 사용한 이동 로봇의 주행 방법

## (Navigation Algorithm for a Mobile Robot by using the Hybrid Structure)

朴 一 \*, 權 寧 道 \*\*, 李 振 秀 \*\*

(Il Park, Young D. Kwon, and Jin S. Lee)

### 요 약

무인 이동 로봇 주행에는 해결해야 할 문제들이 많이 있다. 예를 들어 국부 최소 점에 빠지면 일정한 행동의 반복으로 그 지점을 빠져 나오기가 쉽지 않고 좁은 복도를 지날 때는 심한 흔들림을 보일 수 있다. 이런 문제 외에도, 실시간 장애물 충돌 회피와 로봇의 자세 제어 문제 역시 고려해야 할 중요한 문제들이다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로 본 논문에서는 퍼지 추론을 사용한 실시간 충돌 회피 알고리즘과 최단 경로 계산을 위한 전역 경로 계획기로 이루어진 주행 기법을 제안하고 있다. 제안된 전역 경로 계획기는 계산되어야 할 정보의 양과 전체 계산 시간을 대폭 줄인 비교적 간단한 최단 경로 계산 방식으로 이루어져 있으며 국부 경로 계획기는 퍼지 추론과 과거의 초음파 센서 정보를 이용하여 이동 로봇이 불안정한 주행을 하고 있을 때 실시간 충돌 회피와 함께 안정된 주행을 가능하게 한다.

### Abstract

There are many challenging problems in mobile robot navigation. As an example, a mobile robot may wander around in local minimum and may wiggle when it moves through a narrow corridor. In addition, the real time obstacle avoidance and the posture control of mobile robot are also very important problems. To address these problems, a navigation algorithm which is composed of real time obstacle avoidance algorithm and a global path planner(GPP) that generates the shortest path is presented. In this paper, the global path planner reduce the calculation time by reducing the data to be handled. Also it can make a real time obstacle avoidance by using the fuzzy logic inference. So the presented algorithm provide a stable navigation for the mobile robot when it fall into the unstable navigation.

### I. 서 론

무인 이동 로봇 주행에 관련된 연구는 실시간 충돌 회피<sup>[2] [3] [8]</sup>에 관한 것과 자세 제어<sup>[15]</sup>에 관한 것들이 주를 이루고 있다. 이중 자세 제어는 이동 로봇이 주행할 경로를 미리 알고 있다고 가정된 뒤에 정해진

경로를 안정적으로 추종할 수 있도록 이동 로봇의 조향각이나 속도를 조절하는 일종의 경로 추종 방법을 말한다. 그러나 이 자세 제어는 이동 로봇 주위의 작업 환경을 모르고 있을 경우에는 아무 의미가 없게 된다. 즉 미리 계획된 경로 상에 장애물이 놓이게 되면 미리 계획된 경로를 추종할 수 없기 때문이다. 이러한 문제를 해결하는 기법이 실시간 충돌 회피 방법이다. 본 논문에서는 작업 공간 내에 알려지지 않은 장애물이 존재한다고 했을 때 효과적으로 목적지까지 주행할 수 있는 실시간 충돌 회피 방법을 제안하고 있다. 실시간 충돌 회피 방법은 많은 사람들이 연구를 해 오고 있다. 그중 Khatib<sup>[18]</sup>에 의해 제안된 Potential Field

\* 正會員, LG電子 미디어 通信研究所  
(LG Electronics Media Communication Lab.)

\*\* 正會員, 浦港工科大學校 電子電氣工學科  
(Dept. of E.E. POSTECH)

接受日: 1995年3月16日, 수정완료일: 1996年6月24日

Method는 알고리즘이 간단하기 때문에 널리 사용되고 있다. 하지만 이 방법은 국부 최소 점에 빠질 가능성이 크기 때문에 이 알고리즘을 개선하기 위하여 다른 여러 가지 방법들이 제안되었다. 우선 Elfes<sup>[17]</sup>는 이동 로봇의 전체 작업환경을 일정한 간격의 격자로 나누고 각 격자에 장애물이 존재할 확률 분포를 할당하여 장애물 회피에 사용하였다. 이 방법을 더욱 발전시켜 Borenstein은 Vector Field Histogram(VFH)<sup>[13]</sup> 방법을 개발하였다. 위의 두 가지 방법은 모두다 격자 기본 충돌 회피 방법이다. 따라서 충돌 회피시 다루어야 할 정보량이 많기 때문에 계산 속도면에서는 그다지 효과적이지 못하다. 아울러 전체 격자에 대한 정보를 다 가지고 있어야 하기 때문에 이동 로봇 시스템이 필요로 하는 메모리의 양도 많아지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Mataric<sup>[19]</sup>은 센서 정보를 격자 형태로 저장하지 않고 언어적으로 이를 저장하여 이동 로봇의 주행에 사용하기도 하였다. 그러나 기본적으로 이들 방식들은 주로 국부적인 충돌 회피만 다루고 있기 때문에 이동 로봇의 작업 환경이 복잡한 경우라면 그다지 효율적인 주행 결과를 낼 수 없다. 즉 국부 최소 점에 빠질 확률이 커지고 작업환경에 대한 정보가 저장되어 있지 않다면 목적지까지의 주행시간이 상당히 길어 질 수도 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 학습 능력을 가지는 신경 회로망<sup>[5,13]</sup>이나 사용자가 제공해 주는 규칙을 사용할 수 있는 퍼지 제어 기법<sup>[4,11]</sup>을 이용한 충돌 회피 방법이 많이 제안되고 있다. 신경 회로망이나 퍼지 추론 방법은 이동 로봇의 환경을 학습하거나 사용자가 필요로 하는 충돌 회피 방법을 규칙화 할 수 있다는 점에서 큰 장점이 있다. 아울러 일반적인 격자 기본 충돌 회피 방법은 센서 정보가 불안정하게 들어올 경우나 이동 로봇이 처한 상황이 국부 최소 점이거나 긴 복도를 주행하고 있을 시에는 출력 단계 고주파의 흔들림이 자주 보여 자세 제어의 안정성을 떨어뜨릴 수도 있으나 퍼지 추론이나 신경 회로망을 사용한 방법은 학습 정도나 사용한 규칙 수에 따라 이 문제점을 충분히 해결할 수 있다. 그러나 신경 회로망을 이용한 방법은 학습한 작업 공간 이외에서의 일반화가 상당히 어렵기 때문에 장애물 분포의 변화가 적은 작업 공간 내에서의 간단한 충돌 회피 방법에 적합하다. 반면 퍼지 추론을 사용한 경우는 현재 이동 로봇이 처한 상황에 대한 규칙을 사용자가 제공해 준다면 좋은 결과를 낼 수도 있다. 하지만 이 방법

도 현재의 초음파 센서 정보만 사용한다면 현재 이동 로봇이 처한 상태를 파악해서 추론하기에 많은 어려움이 따른다.

본 논문에서는 퍼지 추론의 장점을 살리기 위하여 위험 영역 개념을 도입하여 과거에 이동 로봇이 주행하여 얻은 센서 정보를 퍼지 추론에 반영하도록 하였다. 아울러 보다 효과적인 주행을 하기 위하여 전역 경로 계획기를 따로 두어 퍼지 추론을 이용한 국부 경로 계획기가 잘못된 동작을 하고 있을 때 이를 보상해 주도록 한다. VFH방식이나 Elfes가 주장한 확실성 격자(Certainty Grid) 방법도 격자 개념을 도입하여 어느 정도 과거의 정보를 현재 조향각 결정에 반영하도록 하였다. 그러나 이들 방법은 기본적으로 격자 기본 방식이고 사용하고 있는 활성 창 크기보다 큰 국부 최소 점이나 긴 복도 주행 시는 문제를 일으킬 수 있다. 물론 퍼지 추론을 이용하여 본 논문에서 제안된 방법에서도 경우에 따라 비슷한 현상이 나타나기는 하나, 이 경우는 저주파 특성을 가지고 있어서 큰 문제가 되지는 않는다. 그리고 이러한 상태에 이동 로봇이 오랫동안 머물러 있을 경우 제안된 주행 기법에서는 전역 경로 계획기가 활성화되어 이동 로봇이 머물고 있는 국부 최소 점에서 벗어날 수 있도록 유도해 준다. 즉 제안된 복합 제어기는 전역 경로 계획기를 실시간으로 이용 가능하도록 계산량을 줄여 기존의 국부 경로 계획기와 같이 사용할 수 있도록 하였다. 제안된 퍼지 추론을 이용한 국부 경로 계획기가 기존의 기법보다 더 좋은 성능을 보이는 이유는 대략 다음과 같다. 이동 로봇의 각도 명령 기준 값과 거리 센서 정보 출력을 제어기의 오차로 생각한다면 기존의 기법은 현재 인식된 거리 센서 정보만 사용하기 때문에 이득 항만 존재하는 P 제어기라고 생각할 수가 있고 제안된 기법은 현재 인식된 거리 센서 정보와 함께 이동 로봇이 주행하면서 인식된 과거의 거리 센서 정보가 퍼지 규칙을 이용하여 출력 계산에 사용될 수 있다. 따라서 퍼지 추론을 사용한 충돌 회피 방법은 일종의 PI 제어기라고 생각할 수가 있다. 따라서 퍼지 추론을 사용한 방식이 기존의 방식보다 안정적인 주행을 할 수 있다. 물론, VFH 기법도 이동 로봇이 주행하면서 계속 격자 값을 개선시키고 이 값들을 이용하여 출력을 구할 수 있으며 이러한 점을 적분기의 특징으로 볼 수 있다. 그러나, 이 경우 격자 값은 계속 커지게 되고 특정 격자 값들은 포화상태(saturation)에 이르게 된다. 결국, 같은 지

도 환경에 대해서도 주행 정도에 따른 격자 값의 변화로 인하여 적당한 문턱 값을 설정하기가 힘들며 격자 값이 크지 않은 주행 초기에는 장애물에 부딪칠 위험이 크다.

본 논문에서는 VFH방법을 포함한 기존의 충돌 회피 방법들이 가지고 있던 문제점들을 보완한 국부 경로 계획기와 전체 지도를 이용하여 이동 로봇이 처한 국부 최소 점이나 고립된 함정에서 탈출할 수 있도록 도와주는 전역 경로 계획기를 조합하여 안전한 주행을 할 수 있는 주행 기법을 제안한다. 제안된 국부 경로 계획기는 퍼지 추론 기법을 사용하여 초음파 센서의 거리 정보로부터 바로 이동 로봇의 조향각을 결정할 수 있도록 하였다. 따라서 제안된 국부 경로 계획기는 기존의 격자 기본 방식의 충돌 회피 방법보다 계산량을 줄였으며 아울러 위험 영역 개념을 도입하여 과거의 초음파 값이 현재의 조향각에 영향을 미칠 수 있도록 하였다.

## II. 제안된 주행 기법

### 1. 제안된 주행 기법의 구조

제안된 주행 기법은 각도 명령(steering angle command) 결정 방법에 따라 3부분으로 나뉜다. 첫 번째 부분은 퍼지 추론<sup>[4]</sup>을 이용한 실시간 충돌 회피, 즉 국부 경로 계획기(Local Path Planner)로써 이 부분은 초음파 센서의 정보와 목적지의 절대 위치만을 안 상태에서 장애물 회피를 한다. 두 번째 부분은 전역 경로 계획기(Global Path Planner)로써 이 부분은 이동 로봇의 주위 환경 전체 정보로부터 보다 대국적인 경로를 계산하게 된다. 전역 경로 계획기는 하위 제어기로부터 엔코더(encoder) 신호를 받아 dead reckoning<sup>[10]</sup>을 통하여 이동 경로 좌표를 알게 된다. 전역 경로 계획기에서는 이렇게 구하여진 좌표계를 이용하여 현재의 초음파 센서 정보를 가지고 전체 지도를 확률 밀도<sup>[17]</sup>의 형식으로 계속 개선시켜 나간다. 전역 경로 계획기는 안정하게 주위를 배회하려는 국부 경로 계획기의 출력에 제약을 가하게 된다. 즉 이동 로봇이 현재의 위치에서 목적지까지 진행하지 못하고 같은 지역을 반복적으로 주행하거나 조향각이 너무 큰 경우 전역 경로 계획기가 작동되어 안전하게 목적지까지 주행할 수 있는 경로를 만들어 준다. 그러나 전역 경로 계획기가 항상 국부 경로 계획기에 제약을 가하는 것

은 아니고 어떤 조건들이 발생하기 전까지는 전역 경로 계획기는 국부 경로 계획기에 아무런 제약을 가하지 않는다. 그 조건들은 II-3절에서 자세히 설명하도록 하겠다. 마지막으로 긴급 정지(Emergency Stop) 부분이 있다. 이 부분은 가장 우선 순위가 높은 출력을 발생하며, 이동 로봇이 장애물에 부딪칠 위기에 당면하는 경우에 작동된다. 긴급 정지 부분은 그림 1에서 보듯이 국부 경로 계획기의 출력을 정지시킬 수 있다. 긴급 정지 부분에서 나오는 신호 C1이 국부 경로 계획기의 EN을 off 시키면 국부 경로 계획기의 출력은 0 이 되고 하위 제어기의 입력은 긴급 정지 부분의 출력이 된다. 여기서 하위 제어기의 입력은 차량의 각도 명령이 된다. C2는 전역 경로 계획기가 국부 경로 계획기의 출력에 가하는 제약이다. 구현된 시스템에서 긴급 정지 부분과 국부 경로 계획기는 5ms의 주기로 새로운 출력을 발생하였고 전역 경로 계획기(GPP)는 필요한 순간에만 출력을 발생하게 하였다.

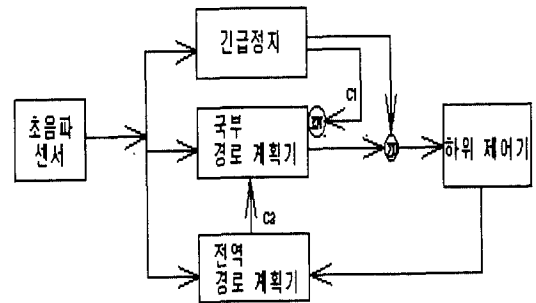


그림 1. 하이브리드 제어기의 구조  
Fig. 1. The structure of the hybrid controller.

그림 1에서 보면 각 부분들은 독립적으로 초음파 센서 정보를 받아들여 최종 조향각을 결정하고 있다. 이와 같은 방식은 Brooks<sup>[11]</sup>에 의해 제안된 행위 기본 구조(Behavior Based Structure)와 유사한 방식을 취하고 있다. 따라서 또다른 행위가 필요할 경우 사용하는 간단히 그 부분을 구성하여 전체 구조에 첨가해 주면 된다. 반대로 한 부분이 필요 없을 경우 그 부분의 출력을 제한하면 된다. 이와 같은 구조를 취함으로써 차후 시스템의 확장이 용이해질 뿐만 아니라 전체적인 시스템의 구현도 간단해지는 장점이 있다.

2. 퍼지 추론을 사용한 실시간 충돌 회피  
이동 로봇의 충돌 회피 그리고 배회를 위한 차량의

각도 결정은 국부 경로 계획기에 의해 이루어진다. 여기서 국부 경로 계획기는 두 부분으로 구성되어 있는데 첫 번째 부분은 센서의 정보를 멤버십 함수와 비퍼지화<sup>[11,12]</sup>를 거쳐 각도 값을 생성해 내는 부분이고, 두 번째 부분은 현재의 환경에 대해서 몇 가지 기본 법칙을 이용하여 정의하고 이에 따라 첫 번째 부분에서 출력된 값에 제한을 가하는 부분이다. 제안된 주행 알고리즘을 구현하기 위하여 이동 로봇은 모두 9개의 초음파 센서를 22.5° 도 간격으로 전방 202.5° 에 배치하였다. 아울러 이동 로봇의 주위를 각 5° 를 대표하는 72개의 원주 부분으로 나누었으며 각 원주 부분은 그 영역의 위험한 정도를 나타내는 위험 정도 값을 가지게 된다. 이 위험 정도 값은 초음파 센서의 거리 정보를 그대로 반영한 원시 위험 정도  $D[i]$  와 잡음 제거를 위해 평탄화 함수를 거친 평탄화 위험 정도  $D[i]$  로 구분된다. 이동 로봇의 최종 주행을 위한 조향각은 평탄화 위험 정도  $D[i]$  로 부터 결정된다. 평탄화 위험 정도  $D[i]$  를 결정하는 과정은 다음과 같다.

국부 경로 계획기의 입력은 초음파 센서의 거리 정보이다. 국부 경로 계획기는 초음파 센서의 거리 정보를 이용하여 장애물이 존재할 수 있는 위험 영역과 그 영역이 얼마나 위험한지를 나타내는 위험 정도를 계산해낸다. 장애물이 존재할 수 있는 위험 영역(danger region)은  $j$  번째 초음파 센서가 속한 원주 부분을 기준으로 양옆으로 위험한 원주 부분의 개수  $d_j$  로 부터 결정된다. 이때 원주 부분의 개수  $d_j$  는 다음과 같은 퍼지 법칙을 사용하여 계산한다.

*If input is CLOSE, output is LARGE*

*If input is MIDDLE, output is MEDIUM.*

*If input is FAR, output is SMALL.*

이 규칙들은 초음파 센서의 거리정보를 위험 영역의 원주 부분 개수로 바꿔주는 역할을 한다. 즉, 장애물까지의 거리가 가까울수록 위험한 원주 부분은 넓어지고 거리가 멀수록 주변 원주 부분이 안전한 것을 의미한다. 그림 2의 (a)는 입력에 대한 멤버십 함수이고, 그림 2의 (b)는 출력 단의 멤버십 함수이다. 그림 2의 (a)에서 퍼지 입력 1.0은 30cm를 의미한다.

따라서  $j$  번째 초음파 센서의 거리 정보  $x_j$ 로 부터 로봇이 피해야 할 위험 영역의 원주부분의개수  $d_j$ 는

singleton defuzzification 방법을 이용하여 다음과 같이 구한다.<sup>[8,11]</sup>

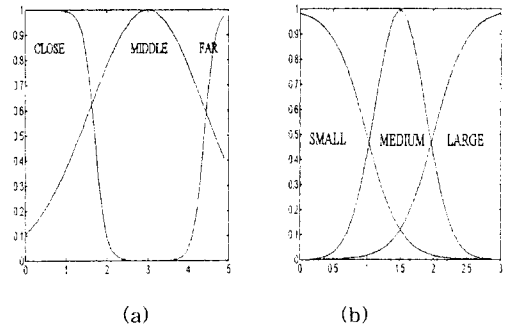


그림 2. 입력 멤버십 함수와 출력 멤버십 함수  
Fig. 2. (a) input membership function (b) output membership function.

$$d_j = \text{int} \left\lfloor \frac{\sum_{k=1}^3 m_k(x_j) b_k}{\sum_{k=1}^3 m_k(x_j)} \right\rfloor$$

where  $0 \leq j < 9$

여기서,  $m_k$ 는  $k$ 번째 퍼지 법칙에 대한 입력 멤버십 함수이다. 그리고,  $b_k$ 는  $k$ 번째 퍼지 법칙에 의한 출력 멤버십 함수의 대표 값이다. 여기서  $\text{int}$  는 정수 연산자로서 우리가 다루는 것은 위험 영역의 원주부분개수이므로 정수만 다루게 된다. 이렇게 구한 위험 영역이 얼마나 위험한지를 나타내는 위험한 정도 값은 다음과 같이 구해진다.

$$k_j = \frac{x_{th}}{x_j}$$

여기서,  $x_{th}$ 는 사용자가 정하는 위험 영역 문턱거리를 나타낸다. 즉  $j$  번째 초음파 센서거리값이  $x_{th}$ 보다 클 경우 그 방향의 장애물은 충분히 멀리 있기 때문에 그 방향의 원주 부분은 안전하다고 생각 될 수 있다. 이렇게 구해진 위험한 정도값  $k_j$ 는  $j$  번째 초음파 센서가 속하는 원주 부분을 중심으로 양쪽으로  $d_j$ 개 만큼의 원주 부분에 원시 위험 정도  $D[i]$  로 할당 된다. 즉  $D[j-d_j]$  부터  $D[j+d_j]$  까지의 원주 부분 값에는  $k_j$ 가 할당된다. 여기서  $D[j]$  는  $j$  번째 초음파 센서가 포함된 원주 부분의 원시 위험 정도를 나타낸다. 퍼지 추론에 의해 구해진 위험 영역의 원주 부분

$d_i$ 는 그위험정도에 따라 서로 겹쳐지는 부분이 나타날 수도 있다. 이런 경우 각 원주 부분의 원시 위험 정도  $D[i]$  는 겹쳐진 위험정도  $k_j$  중 가장 큰 값을 부여 하게 된다. 아울러서 각 센서마다 각기 다른 거리 정보를 가지고 있고 또한 원시 위험 정도  $D[i]$  는 각 초음파 센서가 가지고 있는 거리 측정 상의 오차나 주변 초음파 센서와의 간섭에 의해 발생할 수 있는 잡음 등을 그대로 반영하고 있기 때문에 불연속적인 원주 부분이 생길 수가 있다. 원시 위험 정도에 불연속적인 부분이 생길 경우 이동 로봇의 조향각 결정시 불안정한 방향전환을 할 수 있으므로 이를 방지 하기 위하여 다음과 같이 평탄화함수<sup>13)</sup>를 통과 시켜 평탄화 위험 정도  $D[i]$  를 구한다. 최종적인 조향각은 평탄화 위험 정도  $D[i]$  로 부터 구해진다.

$$D[i] = \left( \sum_{k=1}^l i D'[i-1-l+k] + 2l D'[i] + \sum_{k=0}^{l-1} (l-k) D'[i+1+k] \right) / \left( 2 \sum_{k=1}^l k + 2l \right)$$

9개의 센서에 대하여 위험 영역  $d_i$ 를 모두 구한 후 이들의 합집합으로 나타나는 최종 위험 영역에 속하지 않는 원시 위험 정도  $D[i]$  는 이전 평탄화 위험 정도  $D[i]$  에서 사용자가 정한 일정한 값  $Dec\_Num$  을 빼준값으로 결정된다. 이렇게 해줌으로써 원주 부분의 값  $D[i]$  는 현재의 정보만이 아니라 과거의 정보도 가지고 있게 된다.

다음 그림 3에서는  $D[i]$  가 극 좌표계 에서 나타나는 형태를 보여준다.  $D[i]$  가 어떤 일정한 값보다 작은 경우 이를 안전하다고 규정한다. 안전 부분들이 연속으로 있을 경우 이를 안전 지대라고 하고 이들 중에서 다음 각도 명령을 결정하게 된다. 안전 지대가 하나가 아닐 경우는 목적지가 위치한 지점과 방향이 가장 가까운 것 2개를 선택하고 그 중 차량의 각도 변화가 작은 것으로 결정한다<sup>13) [7] [8] [10]</sup>.

이렇게, 목적지가 고려된 값이긴 하나 적은 변화 폭의 회전 각도를 다음 명령으로 선택함으로써 국부 경로 계획기는 목적지에 영향을 덜 받고 어느 정도 스스로의 배회를 하게 된다. 여기서 구한 차량의 다음 각도 명령 값을  $\theta_{fuzzy}$  라고 한다. 그러나, 복도를 지나는 경우는 제어기의 출력이 민감하게 자주 변할 필요가 없으며, 모퉁이를 돌 경우 이동 로봇이 갑자기 나타나는 벽에 대하여 안정된 주행을 해야 한다. 그래서, 다음과 같은 몇 가지 경우에 대하여는  $\theta_{fuzzy}$  에 제한을 가하였

다. 즉 국부 경로 계획기가 갑작스런 조향을 유도하거나 필요 없는 조향을 유도할 경우 국부 경로 계획기에서 나오는 조향각에 제약을 가하게 된다.

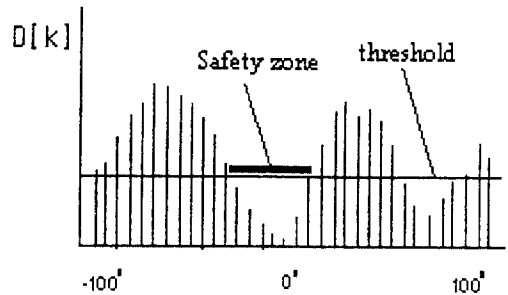


그림 3. 극 좌표계 에서 Danger sector  
Fig. 3. Danger sector in polar form.

- 1) If  $\theta_{fuzzy}$  is large in the left direction & destination is located at the lefthand side, then  $\theta_{fuzzy}$  must be limited.
- 2) If  $\theta_{fuzzy}$  is large in the right direction & destination is located at the righthand side, then  $\theta_{fuzzy}$  must be limited.
- 3) If left\_wall or right\_wall is close & center\_wall is not close, then  $\theta_{fuzzy}$  must be limited.
- 4) If robot motion is wiggling too much, only one steering angle must be determined as soon as possible.

위와 같은 경우에 대하여  $\theta_{limit}$ 을 구하게 된다. 본문에서는 (1) 과 (2)의 경우  $\theta_{limit} = \pm 60^\circ$  로 하였으며 (3)의 경우는  $\theta_{limit} = 5^\circ$  그리고 (4)의 경우는  $\theta_{limit} = \theta_c$  로 정하였다. 여기서  $\theta_c$ 는 사용자가 상황에 따라 정할 수 있는 상수 각도 값이다. 이 경우 실제 퍼지 제어기의 출력  $\theta_f$ 는  $\theta_{fuzzy}$ 와  $\theta_{limit}$ 중 작은 값으로 정해지며 수식적으로는.

$$\theta_f = \min(\theta_{fuzzy}, \theta_{limit})$$

$\theta_c$ 는 threshold 값에 상관없이  $D[i]$  를 고려할 때, 왼쪽이 오른쪽보다 위험한 정도가 크면 양수 값을 가지며 반대인 경우는 음수 값을 가진다. 위와 같은 일련의 과정들은 Borenstein이 제안한 VFH방법과 유사하다고 볼 수 있다. 그러나 제안된 방법은 기본적으로

작업 공간을 격자단위로 나누지 않았을 뿐더러 초음파 센서의 거리 정보를 바로 조향각 결정에 사용할 수 있도록 하였다. 따라서 기존의 방법들과는 달리 조향각 결정을 위한 계산량이 감소하였을 뿐만 아니라 퍼지 추론 기법과 위험 영역 개념을 도입하여 이동 로봇이 주행한 환경을 기억하고 이를 이동 로봇의 주행에 이용할 수 있도록 한 점이 본 논문에서 제안한 알고리즘의 장점이라고 할 수 있겠다. 물론 과거 주행 정보를 제한된 원주 부분의 값으로 기억하기에는 한계가 있다. 따라서 이를 보완하기 위하여 본 논문에서는 전역 경로 계획기를 추가하여 국부 경로 계획기로 해결할 수 없는 문제점들을 해결하였다.

### 3. 전역 경로 계획기를 이용한 각도 결정

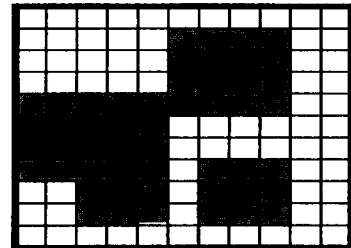
퍼지 제어기의 가장 큰 약점은 현재, 또는 현시점 부근의 정보만을 가지고 조향각(steering angle)을 결정한다는 것이다. 그래서, 만약 이동 로봇이 국부 최소점에 빠지게 되면 경우에 따라서는 절대 빠져 나오지 못하게 된다. 이 점은 물론 퍼지 제어기만의 문제가 아니라 VFF나 VFH 등 국부 지도만으로 조향각을 결정하는 모든 알고리즘에 다 적용되는 심각한 문제이다. 이런 문제점을 해결하고 어떤 경우에도 목적지를 찾아가기 위해서 전역 경로 계획기(Global Path Planner)를 사용하였다. 전역 지도는 격자의 형식으로 정보가 저장되어 있다. 여기서 이동 로봇의 크기는  $55\text{cm} \times 70\text{cm}$  이고, 격자 1개의 크기는  $20\text{cm} \times 20\text{cm}$  이다. 격자의 내용은 그 격자 안에 물체가 존재할 확률이다. 전역 경로 계획기의 알고리즘은 대략 다음과 같다.

- 1) 지도안에서 이동 로봇이 한 점으로 간주되도록 지도를 변형시킨다. 이때 전역 지도의 정보를 이동 로봇의 절반 너비 만큼씩 확장시킨다.
- 2) 이동 로봇의 현재 위치에서부터 격자 단위로 숫자를 부여하여 목적지에서 끝낸다.
- 3) 위와 반대로 목적지에서부터 격자 단위로 숫자를 부여하여 이동 로봇의 현재 위치에서 끝낸다.
- 4) 과정 2)와 3)에서 얻은 numbering map을 서로 더한다.

그림 4는 과정 1)을 보여주고 있다. 즉, 이동 로봇의  $1/2$  너비가 1 cell이라고 할 때, 변형된 벽 정보를 보여 주고 있다. 이 지도에서 이동 로봇은 너비가 0인 한 점으로 간주된다. 이렇게 확장된 지도를 구함으로써 전

역 경로를 구하기 위해 필요한 정보의 양과 계산 속도를 줄여 전역 경로 계획기를 실시간 충돌회피에 사용할 수 있도록 할 수 있다. 그림 5에서는 과정 2)와 과정 3)을 예를 들어 보여 주고 있다. 그림 6에서는 과정 4)를 보여 주고 있다. 과정 4)까지 진행되면 현재 이동 로봇의 위치로부터 목적지까지 일정한 값을 가진 숫자들이 연속으로 나타난다. 그림 6에서처럼 이 연속된 숫자들을 이으면 현재까지의 정보를 이용하여 계산할 수 있는 목적지까지의 최단 경로를 찾을 수 있다. 물론 여기서의 최단 경로란 이동 로봇의 이동 가능 경로 중 가장 작은 거리의 경로라는 것이지 시간이 가장 적게 걸릴 경로라는 것을 의미하는 것은 아니다. 이것은 이 계산된 경로가 회전할 양은 고려되어 있지 않고 단지 이동 거리의 양만을 계산한 것이기 때문이다. 전역 경로 계획기는 항상 계산되는 것이 아니고 국부 경로 계획기를 이용하여 주행하는 도중 다음과 같은 조건이 맞을 경우에 조향각을 계산 해낸다.

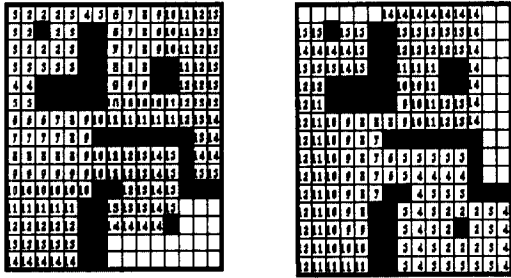
- 1) 현재 온 지점이 전에 한번 이상 와 보았던 지점이다.
- 2) 현재의 지점에서 너무 오래 머물러 있다. 즉, 현재의 시점을 벗어나지 못하고 있다.
- 3) 퍼지 제어기의 출력  $\theta_{fuzzy}$ 가 너무 크다.



■ 실제 지도  
■ 확장된 지도

그림 4. 확장된 지도  
Fig. 4. Extended Map.

1)과 2)를 검사하기 위해서 새로운 지도를 이용하였다. 이 지도의 해상도는 전역 지도의  $1/3$  만큼 낮다. 한 격자의 크기는  $60\text{cm} \times 60\text{cm}$  이다. 1)을 고려해야 하는 이유는 현재 국부 최소점에 갇혀 있는가의 여부를 판별하고 이를 빠져 나오기 위한 것이다. 2)는 II.2절의 여러 조건중 네 번째 조건과 같은 이유처럼 조향각이 좌우로 심하게 흔들려 그 상태를 벗어나지 못하거나 한 지역에서 맴도는 경우를 해결하기 위함이다.



(a) (b)

그림 5. (a) 현재 위치에서 목적지까지의 숫자 매김  
 (b) 목적지에서 현재 위치까지의 숫자 매김  
 Fig. 5. (a) Numbering from current position to destination  
 (b) Numbering from destination to current position

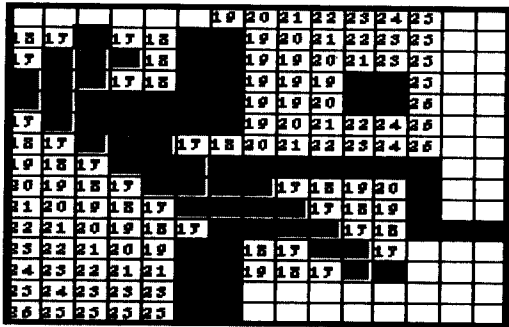


그림 6. 더한 지도에서의 숫자들  
 Fig. 6. Numbers in added map.

3)은 이동 로봇이 막다른 골목에 갇히거나 그에 상응하는 상태에 빠지는 경우를 고려하는 것이다. 이렇게 구한 값을  $\theta_{GPP}$  라고 하자. 이 값은 퍼지 제어기에 제한을 가하게 된다.  $\theta_{GPP}$ 가 퍼지 제어기로 내려가면 퍼지 제어기는 안전 지역 중에서  $\theta_{GPP}$ 에 가장 가까운 값도 값  $\theta_{J\_GPP}$ 를 생성하고 이 값이 최종 출력이 된다.

이렇게 퍼지 제어기와 전역 경로 계획기를 통하여 구하여진 로봇의 회전각은 로봇의 속도 결정에 영향을 미친다. 여기서는 Borenstein<sup>[3]</sup>이 제안한 방식을 그대로 사용하고 있다.

$$VEL = \begin{cases} v \cdot (1 - \theta/\theta_{max}) + v_{min} & |\theta| < \theta_{max} \\ v_{min} & |\theta| \geq \theta_{max} \end{cases}$$

여기서,  $v$ 는 상수 값으로 여기서는 168mm/sec 정도

로 잡았고,  $v_{min}$ 은 84mm/sec로 하였다.  $\theta$ 는 로봇의 회전각을 말하며  $\theta_{max}$ 는 70°로 하였다. VEL은 로봇의 속도 값이다. 실험에 사용된 로봇은 Two-wheeled system이다. 앞뒤로 수개의 보조 바퀴가 있고 중간에 두개의 모터에 연결된 독립된 두 바퀴가 있어서 전 후진은 물론 제자리에서 회전도 가능하게 설계되었다.

### III. 결 과

다음은 이 논문에서 제안된 하이브리드 제어기의 성능을 시험한 모의 실험 결과를 보여준다. 모의 실험에서는 초음파 센서의 송수신 방향이 벽면의 수직 방향과  $\pm 10^\circ$  이상 차이가 나는 경우 반사로 인하여 정보를 얻을 수 없는 것으로 간주하였다. 부드러운 조향각 출력을 위하여 제어기의 출력 단에 저주파 필터를 달아 조향각 명령에 발생할 수 있는 요동을 강제적으로 줄였다. 또한 작은 출력에 의한 조향각의 흔들림은 가끔적 무시하였다. 이것은 좁은 복도에서나 벽 옆을 따라갈 때 좋은 자세 제어를 가져온다. 다음은 모의 실험 결과이다. 그림 7은 간단한 지도 환경에서 이동 로봇의 주행을 보여 주고 있다. 화살표 방향이 차량의 초기 방향이다. 그림 7은 막다른 길이나 함정이 없는 곳이므로 전역 경로 계획기의 사용 없이 긴급 정지부분과 퍼지 제어기의 출력만으로도 목적지까지 잘 가고 있음을 볼 수 있다.

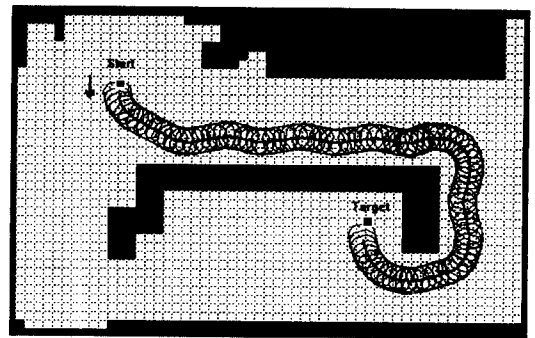


그림 7. 간단한 환경에서의 이동 로봇의 주행  
 Fig. 7. Navigation in a simple map.

다음 그림. 8에서는 보다 복잡한 환경에서 이동 로봇의 주행을 보여주고 있다. 이 환경은 먼저 다음과 같은 문제점들이 존재한다.

1. 목적지 방향에 비좁은 막다른 길이 있다.
2. 빠져 나오기 힘든 국부 최소 점이 있다.

3. 목적지까지 갈 수 있는 유일한 길은 이동 로봇의 크기에 비해 좁고 꾸불꾸불한 복도이다.

획기에 의해 생성된 출력  $\theta_{GPP}$ 는 퍼지 제어기의 출력  $\theta_{fuzzy}$ 에 제한을 가하게 된다.

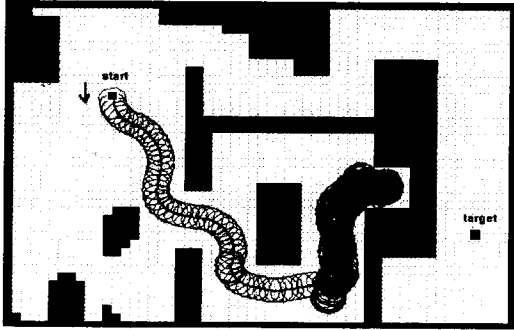
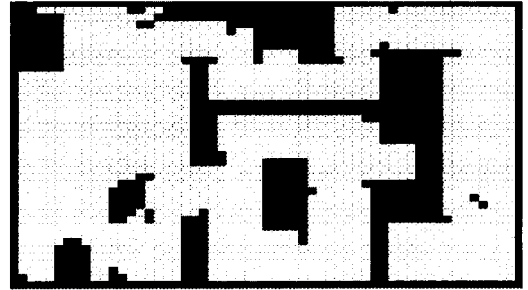


그림 8. 복잡한 환경에서의 GPP가 없는 이동 로봇의 주행  
 Fig. 8. Navigation without GPP in a complex map.

그림 8의 환경에서는 그림 7과 달리 퍼지 제어기만으로는 목적지까지 가지 못하고 국부 최소 점에서 빠져 나오지 못하게 된다. 다음 그림 9는 같은 환경하에서 전역 경로 계획기가 들어간 모의 실험 결과이다.



■ : GPP에 의해 벽으로 인식된 cell

그림 10. 첫 번째 이동 후 GPP에 의해 저장된벽 정보와 실제 벽  
 Fig. 10. Wall data saved after first navigation.

즉  $|\theta_{GPP}| < |\theta_{fuzzy}|$ 인 경우 각도값  $\theta_{f\_GPP}$ 는  $\theta_{GPP}$ 가 되고,  $|\theta_{GPP}| \geq |\theta_{fuzzy}|$ 인 경우 각도값  $\theta_{f\_GPP}$ 는  $\theta_{fuzzy}$ 가 된다. 아래 결과는 그림 9의 경우보다 많이 나아졌다.

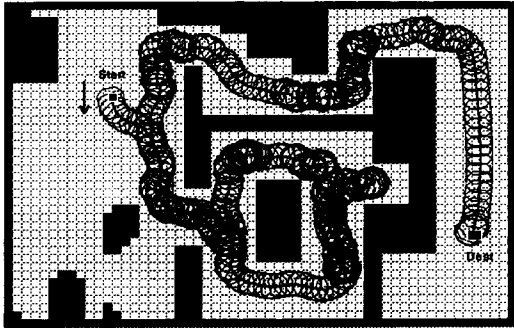


그림 9. GPP가 있는 이동 로봇의 첫 번째 주행  
 Fig. 9. First navigation with GPP.

그림 9에서 화살표 방향이 처음 출발 방향이다. 그림 10에서 검은 색은 실제 벽을 나타내고 그 위에 겹쳐진 회색은 저장된 벽 정보를 나타낸다. 그림 10에서 보면 지나간 지역의 벽 정보가 원래의 벽 정보와는 차이가 있다. 이것은 이동 로봇의 속도 차이에 의한 정보의 손실, 센서의 반사나 노이즈로 인한 벽의 왜곡 내지는 벽을 보지 못하는 경우이다. 그림 11은 목적지까지 한번 왕복한 후에 다시 목적지까지 가는 상황이다. 이 경우 전체 지도를 거의 알기 때문에 배회 없이 장애물 회피만 하면서 최단 경로를 찾아서 간다. 전역 경로 계

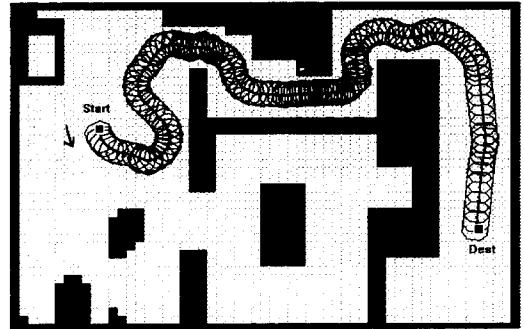


그림 11. GPP를 가진 이동 로봇의 두 번째 주행  
 Fig. 11. Second navigation with GPP.

그림 11의 화살표 방향이 차량의 초기 방향이다. 출발 방향이 예상되는 최단 경로의 방향과 차이가 많이 나는데도 잘 따라감을 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

앞에서 보았듯이 전역 경로 계획기와 퍼지추론을 사용한 국부 경로 계획기를 사용한 하이브리드 제어기는 기존의 제어기에 비해 훌륭한 결과를 보여주고 있다. 모의실험에서도 볼수 있듯이 국부 경로 계획기는 일반적인 환경, 즉 국부 최소점이 없는 환경하에서는 전역



경로기의 도움없이 안전하게 목적지까지 도달할 수 있었다. 퍼지추론을 사용한 국부 경로 계획기는 위험영역에 반영된 과거의 초음파 센서값이 현재의 이동로봇 조향각에 영향을 미쳐 안정한 주행결과를 보여줄 수 있었다. 그리고 국부최소점이 존재하는 작업 환경에서도 전역 경로 계획기에서 계산된 조향각을 참고하여 국부 최소점에서 빠져 나올 수 있는 안전한 조향각을 결정할 수 있다. 그리고 작업환경의 장애물 정보가 충분히 파악된 상태에서는 전역 경로 계획기에서 결정된 조향각과 국부 경로 계획기에서 결정된 조향각을 비교하여 보다 안정적인 주행이 가능한 조향각을 최종 조향각으로 설정함으로써 최적경로에 가까운 경로를 주행할 수 있도록 해준다. 본 논문에서 소개된 전역 경로 계획기의 장점은 정보의 적절한 선택과 가감으로 계산 시간을 줄여 전역 경로 계획기를 실시간 충돌 회피에 사용할 수 있게 한 점이다. 이러한 이점은 먼저 이동 로봇을 한 점으로 가정하여 이동 경로의 너비를 계산 대상에서 제외하였고 이를 통하여 처리해야 할 정보의 양을 상당히 줄였다는 데서 비롯된다. 또한 최단 경로 역시 정확한 거리와 방향이 아닌 근사 값들까지만 계산함으로써 불필요한 계산 시간을 줄였다. 이것은 사람이 길을 찾아갈 때 자신이 가야 할 길을 대강 파악하고 걷는 것이지 정확한 거리와 각도 값을 알고 행동하는 것은 아닌 점과 비슷하다. 이런 방식은 기존의 마디(node)를 먼저 계산하고 각 마디(node)들의 연결 중 가장 짧은 경로를 최단 경로로 계산하는 방식에서 부딪히는 문제를 해결하는데 효과적이다. 마디(node)를 이용하는 방식의 가장 큰 문제점은 마디(node)를 연결하는 짧은 거리를 찾는 것보다 그 전에 어디에 마디(node)를 잡느냐 하는 점이다. 실제로 전체 지도에서 마디(node)를 잡는다는 것은 시간적인 면이나 방법적인 면에서 쉽게 해결할 수 있는 문제가 아니다. 그 외에 마디(node)를 이용하지 않고 최단 경로를 정확히 계산하는 알고리즘<sup>16)</sup>은 있으나 실시간 충돌 회피에는 계산 시간 면에서 부담이 많다. 그리고 여기서 소개된 전역 경로 계획기는 기존의 마디(node)를 이용한 최단 경로 알고리즘보다 계산 시간을 상당히 줄였다. 실제로 M68040이 내장된 VM40 보드에서 작업한 경우 20m × 20m의 환경에서 어떤 두 지점 사이의 최단 경로를 계산하는데 걸리는 시간은 700msec 이하 였다. 실험에서 이동 로봇은 직선속도 평균 초속 30cm/s로 여러 종류의 장애물들을 회피하고 목적지에 도달하기 위해

자신의 너비의 1.2배 정도되는 좁은 문을 통과하는 결과를 보였다. 그러나 문제점은 있다. 여기서 제안한 방법은 국부 지도만 바뀌는 경우에도 최단 경로를 찾기 위해서는 전역 지도 전부를 다시 처리해야 한다. 결국 지도 전체 크기에 따라 경로를 찾는 시간이 차이가 많이 나게 될 수밖에 없다. 물론 DSP 보드와 같은 빠른 처리 속도를 가진 특히 데이터 액세스 시간이 아주 빠른 보드를 사용하는 경우는 이런 문제는 바로 해결된다.

※ 이 연구는 지능 자동화 연구센터(ARC)의 연구비 지원에 의한 결과임.

### 참 고 문 헌

- [1] R. A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE J. Robotics Automat.*, vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, 1986.
- [2] J. Borenstein and Y. Koren, "Real time obstacle avoidance for fast mobile robots," *IEEE Trans. Systems Man Cybern.*, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, Sept./Oct. 1989.
- [3] J. Borenstein and Y. Koren, "The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," *IEEE Trans. Robotics Automat.*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, June 1991.
- [4] K. T. Song and J. C. Tai, "Fuzzy Navigation of a Mobile Robot," *IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems.*, pp. 621-627, July 7-10, 1992.
- [5] S. Nagata, M. Sekiguchi, and K. Asakawa, "Mobile Robot Control by a Structured Hierarchical Neural Network," *IEEE Control Systems Magazine.*, pp. 69-76, April 1990.
- [6] M. H. Hassoun and A. J. Sanghvi, "Fast Computation of Optimal paths in Two- and Higher-Dimension Maps," *Neural Networks.*, vol. 3, pp. 355-363, 1990.
- [7] 강민구, 이진수, 김상우, "이동 로봇에서의 효율적인 자세 제어 방법," 한국 자동 제어 학회, pp. 387-392, 1992
- [8] Y. D. Kwon and Jin. S. Lee, "An Obstacle Avoidance Algorithm for Mobile Robot:

- Weight Safety Vector Field Method," *proc. ASCC*, June, 1994.
- [ 9 ] 배본호, "ALV 시스템의 구현," 포항공대 석사 논문, 1992
- [ 10 ] 강민구, "이동 로봇의 자세 제어와 실시간 충돌 회피 관한 연구," 포항공대 석사 논문, 1993
- [ 11 ] Terano, Asai and Sugeno, "Applied Fuzzy System," 박민용, 최항식 역, 1990
- [ 12 ] H. J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and its Applications," second edition, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [ 13 ] James A. Freeman and David M. Skapura, "Neural Networks," Addison Wesley, 1992.
- [ 14 ] H. Ishiguro, K. Ueda and S. Tsuji, "Omnidirectional Visual Information for Navigating a Mobile robot," *IEEE*, 1993.
- [ 15 ] R. A. Brooks, "A Robot that walks; Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network," *Neural Computation*, 1989.
- [ 16 ] Y. Kanayama and S. Yuta, "Vehicle path specification by a sequence of straight lines," *IEEE J. Robotics Automat.*, vol. 4, no. 3, pp. 265-276, June 1988.
- [ 17 ] A. Elfes, "Sonar based real mapping and navigation systems," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 1151-1156, 1986.
- [ 18 ] O. Khatib, "Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", *The Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 1, 1986.
- [ 19 ] Maja J. Mataric, "Integration of Representation Into Goal Driven Behavior Based Robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 8, No 3, pp. 304-312, June 1992.

---

 저 자 소 개
 

---

## 朴 一(正會員)

1971년 1월 27일생. 1993년 2월 포항 공과 대학교 전자전기 공학과 공학사. 1995년 2월 포항공과 대학교 대학원 전자전기 공학과 공학석사. 1995년 ~ 현재 LG 전자 미디어 통신 연구소 연구원. 주관심 분야는 무인 이동로봇 시스템에 관한 구조론과 실시간 처리 알고리즘, ASIC 설계등임.

李 振 秀(準會員) 第 32卷 B편 第 2號 參照

## 權 寧 道(準會員)

1968년 11월 5일생. 1991년 2월 한국과학기술원 과학기술대학 전기전자공학과 공학사. 1994년 2월 포항공과 대학교 대학원 전자전기 공학과 공학석사. 1994년 2월 ~ 현재 포항공과 대학교 전자전기 공학과 박사과정 재학중. 주관심 분야는 이동로봇 설계, 실시간 충돌회피 및 경로 계획, 지능 제어, AI 등임